

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局(43) 国际公布日:
2003年7月10日(10.07.2003)

PCT

(10) 国际公布号:
WO 03/056727 A1

(51) 国际分类号⁷: H04B 13/02

(21) 国际申请号: PCT/CN02/00360

(22) 国际申请日: 2002年5月28日(28.05.2002)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
01145134.3 2001年12月30日(30.12.2001) CN

(71) 申请人(对除美国以外的所有指定国): 中国科学院声学研究所(INSTITUTE OF ACOUSTICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) [CN/CN]; 中国北京市海淀区中关村路17号, Beijing 100080 (CN)。

(72) 发明人;及

(75) 发明人/申请人(仅对美国): 朱维庆(ZHU, Weiqing) [CN/CN]; 王长红(WANG, Changhong) [CN/CN]; 朱敏(ZHU, Min) [CN/CN]; 潘锋(PAN, Feng) [CN/CN]; 中国北京市海淀区中关村路17号, Beijing 100080 (CN)。

(74) 代理人: 隆天国际专利商标代理有限公司(LUNG TIN INT'L PATENT & TRADEMARK AGENT LTD.); 中国北京市朝阳区慧忠路5号远大中心B座18层, Beijing 100101 (CN)。

(81) 指定国(国家): AU, CA, CN, JP, NO, RU, US

(84) 指定国(地区): 欧亚专利(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 欧洲专利(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR)

根据细则4.17的声明:

- 关于申请人在国际申请日有权申请并被授予专利(细则4.17(ii))对除美国以外的所有指定国
- 发明人资格(细则4.17(iv))仅对美国

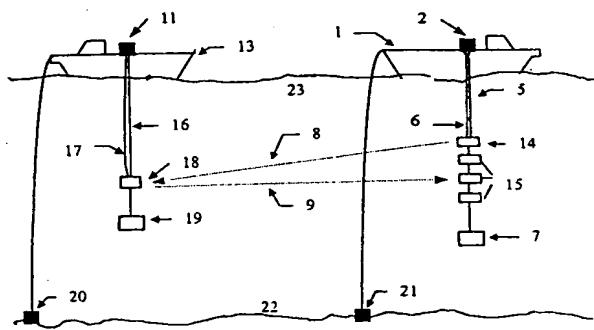
本国际公布:

- 包括国际检索报告。

所引用双字母代码和其它缩写符号, 请参考刊登在每期PCT公报期刊起始的“代码及缩写符号简要说明”。

(54) Title: WATER ACOUSTIC COHERENTLY COMMUNICATION SYSTEM AND SIGNAL PROCESSING METHOD HAVING HIGH CODE RATE, LOW PROBABILITY OF ERROR

(54) 发明名称: 高码速率低误差概率的水声相干通信系统和信号处理方法



(57) Abstract: The present invention relates to a kind of water acoustic coherently communication system and signal processing method having high code rate, low probability of error. The present invention relates to a kind of water acoustic coherently communication system and signal processing method for transferring instruction, data and picture underwater at high code rate, low probability of error. The system includes a mainframe and a consumer machine, in which the mainframe is fitted on a mother ship or main control underwater vehicle A, which includes an electronic extension set, a transmission energy converter and a receive line array which is vertically hung in water and made up of more than two hydrophones. The consumer machine is fitted on an underwater vehicle B, which includes an electronic extension set and a send-receive energy transducer. The inventive water acoustic coherently communication signal processing method adopts space diversity technology, self-optimization self-adaptive decision feedback equalizer and self-optimization self-adaptive phase tracker team working signal processing method, overcome influence of channel and vehicles moving, so as to the received signal is very close to the transmitted signal, and bit probability of error lower.

[见续页]

WO 03/056727 A1



(57) 摘要

本发明涉及一种用于在水下传输指令、数据和图像的高码速率、低位误差概率水声相干通信系统和水声相干通信信号处理方法。包括主机和从机；其中主机安装在母船或主控水下载体 A 上，它包括电子分机、发射换能器和垂直悬挂于水中的由 2 个以上水听器组成的接收线阵。从机安装在水下载体 B 上，包括电子分机和收发合用的换能器。本发明的水声相干通信信号处理方法采用空间分集技术、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器联合工作的信号处理方法，克服信道的和载体运动的影响，使接收的信号十分接近发射信号，位误差概率很低。

高码速率低误差概率的水声相干通信系统和信号处理方法

技术领域

本发明涉及一种水声通信技术，特别是涉及一种高码速率、低位误差概率的水声相干通信系统和水声相干通信信号处理方法。

背景技术

目前水声相干通信系统和信号处理方法概括如下：

(1) 例如 J. G. Proakis 等人的美国专利 5844951 “Method and apparatus for simultaneous beam forming and equalization” 中介绍了多通道接收机中多通道联合和均衡的方法和仪器。接收机同时实现分集联合、均衡和同步。该发明的方法和仪器提供了用于水声数字通信系统中的复杂性简化了的自适应多通道接收机。该发明的内容主要是水声相干通信系统的接收机，见图 1，主要有三个方面的发明，介绍如下：

- (A) 多通道接收机，实现空间分集，在图 1 中有 1.....K 个通道。
- (B) 判决反馈自适应均衡器(DFE)，图 1 中 $a_1(n)$ $a_k(n)$ 通道为均衡器的前段， $b(n)$ 为均衡器反馈段。采用快速数值稳定的递归最小二乘(RLS)方法实现自适应均衡。
- (C) 相位跟踪器实现信号同步，图 1 中的 $p_1(n)$ $p_k(n)$ 为相位跟踪器。采用二阶锁相环(DPLL)的方法实现相位跟踪。

(2) M. Sonnenschein 等人的美国专利 6130859 “Method and apparatus for carrying out high data rate and voice underwater communication” 中介绍了发射和接收高速率数据以及语言通信的水下仪器，它包括 1. 一个发射机；2. 一个接收机；3. 一个多普勒频移补偿器。多普勒频移补偿器测量两个未调制信号中一个的频率，此未调制的信号作为调制的信号一部分发射出去，将测得的频率与预设的频率比较，求得多普勒频移。

目前现有的水声相干通信技术中存在 3 个主要缺点，(1) 它们不能快速检测和跟踪信号的相位，因此均衡器系数的相位发生旋转，均衡器有时失效。美国专利 5844951 中采用二阶锁相环检测和跟踪信号相位，由于其中的二个系数是确定的，它不能适应水声信道的快速时变特征。当信道的界面、水体和载体等的运动速度超过 0.14m/s 时，二阶锁相环即失效。美国专利 6130859 中一次

至少发射两个未调制信号中的一个，求得多普勒频移，这是这一次发射中的平均多普勒频移。对于快速时变的水声信道，不足以跟踪信号相位。对宽带信号不足以代表运动速度。(2)美国专利 5844951 中采用了快速数值稳定的递归最小二乘(RLS)方法实现自适均衡，实验表明，在信道比较复杂时，它跟不上信道的变化，均衡器失效。(3)美国专利 5844951 中的自适均衡器系数的个数均为数拾个，运算比较复杂，实现时对硬件的要求比较高。

发明内容

本发明的目的：(1)为了解决已有的水声相干通信装置和信号处理方法不能快速检测和跟踪信号的相位的缺陷；(2)目的之二在于解决已有的水声通信装置和信号处理方法中自适应判决反馈均衡器不能快速地跟踪水声信道引起的信号变化；(3)目的之三在于解决已有的自适应判决反馈均衡器系数的个数较多，使硬件比较复杂的缺点；(4)目的之四为了克服水中多途效应；从而提供一种具有高码速率、低位误差概率的水声相干通信系统及水声相干通信信号处理方法。

本发明的目的是这样实现的：本发明提供的用于在水下传输指令、数据和图像的高码速率、低位误差概率水声相干通信系统，包括一个由发射换能器、悬挂于水中的接收线阵和电子分机组成的主机和一个由收发合用的换能器和电子分机组成的从机；其中主机安装在母船或主控水下载体 A 上，发射换能器和接收线阵从母船或主控水下载体 A 上悬挂到水中，发射换能器和接收线阵的电缆分别与电子分机中的发射机和多通道接收机连接；从机安装在水下载体 B 上，收发合用换能器直接安装在水下载体 B 上，其电缆与从机的电子分机中的发射机和接收机连接；其特征是：该系统的中心频率在 7k~45kHz 之间，工作带宽在 5k~20kHz 之间；所述的主机中的接收线阵由 2~16 个水听器组成，垂直悬挂于水中(称为空间分集技术)，相邻水听器之间的间距在 8~40 个波长之间，各水听器在水平方向无指向性，接收灵敏度频率响应满足该系统规定的工作频带要求。

所述的发射换能器或从机中的收发合用换能器包括在水平方向无指向性，或有指向性换能器，其波束开角为 60~120 度。

所述的主机的电子分机包括发射机、多路接收机、多通道数据采集器、高速数字信号处理器、输入输出接口以及主控计算机；其中发射换能器和接收线阵的电缆分别与电子分机中的发射机和多通道接收机连接，接收机与多通道数

据采集器电连接，多通道数据采集器与高速数字信号处理器电连接，高速数字信号处理器与带有硬盘的主控计算机电连接，输入输出接口与主控计算机、发射机、多通道接收机电联接。

所述的从机的电子分机包括发射机、一路接收机、数据采集器、高速数字信号处理器、输入输出接口以及主控计算机；其中收发合用换能器分别与接收机、发射机电连接，一路接收机的输出端口通过数据采集器与高速数字信号处理器电连接，输入输出接口的 2 个输出接口分别接发射机、一路接收机，输入输出接口还分别与高速数字信号处理器、以及主控计算机连接；

所述的主机和从机中的发射机在程序控制下工作，程序通过输入输出接口控制发射机的启动、停止和发射的波形，输出的大功率脉冲信号驱动换能器向水中发射声波。发射机的输出功率不小于 5W。

所述的主机中的多路接收机由 2~16 通道接收机组成，每个通道与 1 个水听器相联接。所述的从机中的接收机为单通道接收机，与收发合用换能器连接。各通道的频率响应满足中心频率在 7k~45kHz 之间，工作带宽在 5k~20kHz 之间的工作频带要求。各通道具有不小于 40dB 的增益，具有带通滤波器以滤除工作频带以外的噪声和干扰，并具有自动增益控制能力。自动增益控制可以用反馈电路实现，也可以通过软件反馈实现，由软件分析信号幅度，计算出反馈量，通过输入输出接口调整增益。接收机可以采用正交混频电路，输出正交的基带信号也可以不作混频，直接输出载频信号。输出信号的幅度要适合多通道数据采集器的要求。

所述的主机中的多通道数据采集器主要用于对经过接收机处理后的回波信号进行数据采集，其通道数不少于接收机通道数，对每一通道的采样速率不低于接收机输出信号带宽的 4 倍，AD 转换器的位数不低于 10 位。

所述的从机中的数据采集器的采样速率不低于接收机输出信号带宽的 4 倍，AD 转换器的位数不低于 10 位。

所述的主机中的高速数字信号处理器用于对数字化的回波信号进行实时处理，按照空间分集、多通道自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器联合信号处理方法从回波中恢复出其携带的信息。要求其处理能力不小于 400MIPS，RAM 空间不小于 256k 字节，与多通道数据采集器之间的数据通过率不低多通道数据采集器的输出数据率。

所述的从机中的高速数字信号处理器用于对数字化的回波信号进行实时处

理，按照自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器联合信号处理方法从回波中恢复出其携带的信息。要求其处理能力不小于 33MIPS，RAM 空间不小于 128k 字节，与数据采集器之间的数据通过率不低于数据采集器的输出数据率。

所述的主机和从机中的输入输出接口用于电子分机中主控计算机和高速数字信号处理器对多路/一路接收机、发射机、电源、唤醒电路等部分的数字和模拟信号接口，要求至少具有 1 路以上 DA 输出，DA 输出分辨率不低于 10 位，更新速率不低于 30k SPS，用于输出多相移键控（MPSK）调制的发射信号到发射机。

本发明提供的应用本发明的高码速率低误差概率水声相干通信系统进行水声相干信号处理的方法，包括信号的发射过程、接收过程和接收信号的处理过程；其中信号的发射过程包括：主机/从机首先把待发送的数据进行调制，调制后的数据经过输入输出控制器送到发射机，发射机驱动发射换能器/收发合用换能器发射声波；其中主机的接收过程包括：从机发射的声波在水中传播，主机的接收线阵的各个水听器把接收到的声波信号转换成电信号馈给多路接收机，多路接收机处理后经多通道数据采集器变成数字信号；其中从机的接收过程包括：主机发射的声波在水中传播，从机的收发合用换能器把接收到的声波信号转换成电信号馈给接收机，接收机处理后经数据采集器变成数字信号；其中接收信号的处理过程包括：数字化的接收信号在高速数字信号处理器中进行处理，获得的结果存在硬盘里，或者经由串行口送到其它终端设备中；其特征是：发射过程的数据调制方式为多相移键控调制；主机的接收过程采用具有多个水听器的接收线阵、多路接收机和多通道数据采集器，实现空间分集；处理过程采用空间分集、多通道自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器联合信号处理方法，其中多通道自适应判决反馈均衡器采用快速自优化最小均方误差方法，其增益因子 μ 是采用最小均方误差（LMS）方法自适应调整的；自最佳自适应相位跟踪器对多个通道的信号分别进行相位补偿，采用快速自优化最小均方误差方法，其增益因子 λ 是采用最小均方误差（LMS）方法自适应调整的。

本发明的水声相干通信信号处理方法为空间分集、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器联合信号处理方法，相应的基于自适应多通道判决反馈均衡器（DFE）的相干接收机见附图 1。其特征在于多通道自适应判决反馈均衡器采用快速自优化最小均方误差（FOLMS）方法，其增益因子 μ 是采

用 LMS 方法自适应调整的；自最佳自适应相位跟踪器对多个通道的信号分别进行相位补偿，采用快速自优化最小均方误差（FOLMS）方法，其增益因子 λ 是采用 LMS 方法自适应调整的。

所述的高码速率、低位误差概率水声相干通信系统主机和从机的发送工作流程如下：

主控计算机把待发送的数据传输给高速数字信号处理器，由高速数字信号处理器进行打包组织、编码、调制，产生数字化的波形，然后通过输入输出接口的 DA 输出到发射机，由发射机进行功率放大，产生大功率多相移键控（MPSK）电脉冲信号驱动发射换能器，转换成声脉冲信号并向水中发射。

所述的高码速率、低位误差概率水声相干通信系统主机和从机的接收工作流程如下：

对方发射的声波信号被主机的接收线阵或从机的收发合用换能器接收，收到的信号经接收机处理后，通过数据采集器将其变为数字信号；数字信号被输入到高速数字信号处理器，高速数字信号处理器将对数字信号进行处理，处理结果被输入到计算机中，并保存在硬盘上，也可经串行口输出到其它终端设备中。

所述的高码速率、低位误差概率水声相干通信系统的工作流程如下：

主机和从机之间的通信为半双工方式，由主机开始通信过程。主机首先发送一个唤醒信号，然后等待从机的应答。如未收到应答则重复此过程。从机处于低功耗状态下，当其唤醒电路接收到唤醒信号后，激活从机的其它电路，从机进入正常工作状态后，向主机发送一个应答信号。当从机没有唤醒电路时，接收到唤醒信号后，也向主机发送一个应答信号。主机接收到从机的应答后把待传输的数据进行打包组织、编码、调制和发射，从机接收声波，进行实时处理，恢复出主机发送的数据。主机发送结束后，从机向主机进行数据传输。从机把待传输的数据进行打包组织、编码、调制，然后发射出去，主机在不发射时始终处于接收状态，接收到从机的声波信号后，进行实时处理，恢复出从机发送的数据。

本发明的优点在于：(1)由于使用本发明的用于高码速率、低位误差概率水声相干通信系统和信号处理方法进行工作时把水声信道看成是在延时域和频率域双扩散的模型，认为水声信号的相位是一快速变化的随机量。本发明的最佳自适应相位跟踪器在图 1 中以 $p_i(n)-p_k(n)$ 表示，它是一采用最小均方 (LMS)

方法的相位估计器，LMS 方法适用于随机量的估计。不同于一般 LMS 方法中把增益因子 γ 看成是确定量，本发明中把 LMS 方法中的 γ 看成是随机量，对 γ 再采用 LMS 方法进行估计，也即 γ 值会自行选择自最佳值。上述表明，在本发明的自最佳自适应相位跟踪器中采用了双重 LMS 方法，因此它能跟踪快速变化的随机量，即信号的相位。

(2) 由于使用本发明的用于高码速率、低位误差概率水声相干通信系统和信号处理方法进行工作时把水声信道看成是延时域和频率域双扩散的模型，认为水声信号的幅度是一快速变化的随机量。本发明的自最佳自适应判决反馈均衡器在图 1 中以 $a_1(n)$ $a_2(n)$ 和 $b(n)$ 表示，它采用最小均方 (LMS) 方法进行自适应运算。不同于一般的 LMS 方法中把增益因子 μ 看成是确定量，本发明中把 LMS 方法进行自适应运算，也即 μ 值会自行选择最佳值。上述表明，在本发明的自最佳自适应判决反馈均衡器中采用了双重 LMS 方法，因此它能跟踪快速变化的随机量，即信号的振幅。

(3) 由于使用本发明的用于高码速率、低位误差概率水声相干通信系统和信号处理方法进行工作时全采用最小均方 (LMS) 方法，与 RLS 方法相比，LMS 方法简单，运算量小。又由于采用双重 LMS 方法，自最佳自适应相位估计器和自最佳自适应判决反馈均衡器的阶数小于 11。

(4) 由于使用本发明的用于高码速率、低位误差概率水声相干通信系统和信号处理方法进行了数次湖上试验，主机和从机各装在一条船上，在多个距离上进行水声通信试验。在距离 2000 米处信道最为复杂，试验数据分析结果见图 12 和图 13。图 12 是本发明的空间分集、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器获得的结果，位误差概率 1.9×10^{-5} 。图 13 中是美国专利 5844951 中的空间分集、快速数值稳定的递归最小二乘 (RLS) 和二阶锁相环算法获得的结果，位误差概率为 1.95×10^{-2} 。本发明结果明显好于美国专利 5844951 中的结果。

(5) 试验结果见图 14。由图可见，当相对运动速度小于和等于 1.4m/s 时，位误差概率仍可保持为 10^{-5} ；该结果明显好于美国专利 5844951 中的 0.14m/s。

(6) 在多个距离上的试验结果见图 15。由图可见，接收图像与发送图像看不出明显差别。在 4000m 处，传输速率 10kbits/s，位误差概率好于 10^{-4} 。由此得到，作用距离 · 传输速率 = 40km · kbits/s。达到了国际上 20 世纪九十年代末国际水平的上限，见图 16。图中曲线为上限，曲线上的*是本发明的结果。

附图说明

图 1 基于自适应多通道判决反馈均衡器 (DFE) 的相干接收机

图 2 本发明的水声相干通信系统工作示意图

图 3 本发明的水声相干通信系统主机方框图。

图 4 本发明的水声相干通信系统从机方框图。

图 5 本发明的水声相干通信系统的发射机电路框图

图 6 本发明水声相干通信系统的接收机一个通道的电路框图

图 7 本发明的水声相干通信系统多通道采集器框图

图 8 本发明的水声相干通信系统高速数字信号处理器电路框图

图 9 本发明的水声相干通信系统输入输出接口框图

图 10 本发明的水声相干通信系统唤醒电路框图

图 11a 本发明的水声相干通信系统发射软件流程图

图 11b 本发明的水声相干通信系统接收软件流程图

图 11 水声相干通信系统软件流程图

图 12(a) 本发明的相位跟踪器中 LMS 估计器的增益因子 γ 随符号数的变化

图 12(b) 本发明自适应均衡器中 LMS 估计器的增益因子 μ 随符号数的变化

图 12(c) 本发明的分析结果中的均方误差 (MSE) 随符号数的变化

图 12(d) 本发明的分析结果中的 3 通道相位估计随符号数的变化

图 12(e) 本发明的分析结果中的系统输出星座图

图 12(f) 本发明的分析结果中的符号错误分布

图 12 本发明的空间分集、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器算法在信道最复杂时的试验数据分析结果, 信号为 QPSK, 传输速率 10kbits/s, 作用距离为 2000m, 位误差概率 1.90×10^{-5} 。均衡器系数阶数 $[a_1; a_2; a_3; b] = [1; 1; 1; 11]$ 。

图 13 (a) 美专利 5844951 分析结果中的均方误差 (MSE) 随符号数的变化

图 13 (b) 美专利 5844951 分析结果中的系统 3 通道相位估计随符号数的变化

图 13 (c) 美专利 5844951 的分析结果中的系统输出星座图

图 13 (d) 美专利 5844951 的分析结果中的符号错误分布

图 13 美专利 5844951 的空间分集、快速数值稳定的递归最小二乘 (RLS) 和

二阶锁相环算法在信道最复杂时的试验数据分析结果，信号为 QPSK，传输速率 10kbits/s，作用距离为 2000m，位误差概率 1.95×10^{-2} 。均衡器系数个数 $[a_1; a_2; a_3; b] = [2; 2; 2; 12]$ 。

图 14(a) 本发明的仿真分析结果中的均方误差 (MSE) 随符号数的变化

图 14(b) 本发明的仿真分析结果中的星座图

图 14(c) 本发明的仿真分析结果中的符号相位随符号数的变化

图 14(d) 本发明的仿真分析结果中的符号错误分布

图 14 本发明的空间分集、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器算法的仿真分析结果，信号为 QPSK，传输率 10kbits/s，信噪比 15dB，相对速度 1.4 米/秒，位误差概率 10^{-5} 。

图 15 应用本发明系统接收图像与发送的源图的比较，图中看不出明显差别

图 16 国际上现有水声通信系统能够达到的指标 (距离×作用距离) 及上限，上限由曲线表示。曲线上的*号是我国达到的指标。

图 17 本发明一实施例的湖上试验设备布放图；左：发射船，右：接收船。

图 18(a) 本发明自适应相位跟踪器中 LMS 估计器的增益因子 γ 随符号数的变化

图 18(b) 本发明自适应均衡器中 LMS 估计器的增益因子 μ 随符号数的变化

图 18(c) 本发明的分析结果中的均方误差 (MSE) 随符号数的变化

图 18(d) 本发明的分析结果中的 3 通道相位估计随符号数的变化

图 18(e) 本发明的分析结果中的输出星座图

图 18(f) 本发明的分析结果中的符号错误分布

图 18 本发明的空间分集、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器算法对试验数据分析结果，信号为 QPSK，传输速率 10kbits/s，作用距离为 4000m，位误差概率 1.75×10^{-5} 。均衡器系数阶数 $[a_1; a_2; a_3; b] = [2; 2; 2; 9]$ 。

图 19(a) 美专利 5844951 的分析结果中的均方误差 (MSE) 随符号数的变化

图 19(b) 美专利 5844951 的分析结果中的通道相位估计随符号数的变化

图 19(c) 美专利 5844951 的分析结果中的输出星座图

图 19(d) 美专利 5844951 的分析结果中的符号错误分布

图 19 美专利 5844951 的空间分集、快速数值稳定的递归最小二乘(RLS)和二阶锁相环算法对试验数据分析结果, 信号为 QPSK, 传输速率 10kbits/s, 作用距离为 4000m, 位误差概率 2.15×10^{-2} 。

图面说明如下:

1. 母船或主控水下载体 A	2. 主机的电子分机
3. 发射换能器	4. 接收水听器阵
6. 承重缆	7. 重物
9. MPSK 信号	10. 水下载体 B
12. 收发合用换能器	13. 发射船(模拟水下载体 B)
14. 无指向性发射换能	15. 无指向性接收水听器线阵
16. 承重缆	17. 电缆
19. 重物	20. 21. 锚
	22. 水底
	23. 水面

具体实施方式

实施例 1

按照图 1、图 2 和图 3 制作一用于高码速率、低位误差概率的水声相干通信系统, 在某湖上进行试验。湖上试验布放图见图 17, 该系统包括安装在母船 1 上的主机和安装在发射船 13 上的从机。发射船模拟水下载体 B, 等效于图 2 中的 10。

主机的方框图见图 3。主机的电子分机 2 安放在母船 1 上, 接收水听器阵 15 由三个水平无指向性水听器组成, 相邻水听器之间的间距约为 10 个波长。水平无指向性发射换能器 14 和水听器线阵 15 由承重缆 6 和重物 7 悬挂于水中, 通过电缆 5 连接到电子分机 2 上。

从机的方框图见图 4。从机的电子分机 11 安放在发射船 13 上, 无指向性收发合用换能器 18 由承重缆 16 和重物 19 悬挂于水中, 通过电缆 17 连接到从机的电子分机 11 上。

主机和从机的发射机由信号转换、驱动级、功率级、变压器, 按信号走向顺序电连接组成(框图见图 5), 除变压器外, 其它均可由国内外市场上购得。变压器采用盒式铁氧体材料, 变比根据与换能器阻抗匹配的要求确定。系统中的各部分结合附图制作, 以下是本实施例的详细说明:

图 6 是主机和从机的接收机一个通道的电路方框图, 它包括前放、自动增

益控制(AGC)电路、带通滤波器(BPF)、正交混频、低通滤波器和缓冲放大器，按图6 电路的信号走向顺序电连接构成；图中的部件是国内外市场均可购得的芯片。

图7 是多通道数据采集器的方框图，它包括模拟输入、多路模拟开关(型号为MAX308)、A/D转换器(型号为AD1671)、FIFO存储器(型号为IDT7204)、逻辑控制电路、时钟发生器、主控计算机总线和DSP扩展总线，按图7 中的信号走向顺序电连接构成。

图8 是高速数字信号处理器方框图，它包括数字信号处理芯片(型号为TMS320C30)、双口RAM(型号为IDT7024)、静态RAM(SRAM)、逻辑控制器和扩展总线，按图8 中的信号走向顺序电连接组成。

图9 是输入输出接口电路方框图，它包括数字输出接口、数字输入接口、定时器(型号为8254)、D/A转换器(型号为AD7245A)、逻辑控制器和主控计算机接口，按图9 中的信号走向顺序电连接构成。

图10 是唤醒电路方框图，它包括一个窄带放大器和一个锁相环，按图10 中的信号走向顺序电连接构成。图7-10 中的各种数字芯片均为通用芯片。

系统的中心频率为17.5kHz，带宽为5kHz，信号调制方式为MPSK，唤醒信号为13kHz的单频脉冲。系统的发射和接收按图11a 和图11b 软件流程进行，发射时主控计算机把待发送的数据传输给高速数字信号处理器，由高速数字信号处理器进行打包组织、编码、调制，产生数字化的波形，然后通过输入输出接口的DA输出到发射机，由发射机进行功率放大，产生大功率多相移键控(MPSK)电脉冲信号驱动发射换能器3 或从机的收发合用换能器12，转换成声脉冲信号并向水中发射。

接收时对方发射的声波信号被主机的接收线阵4 或从机的收发合用换能器12 接收，收到的信号经接收机处理后，通过数据采集器将其变为数字信号；数字信号被输入到高速数字信号处理器，高速数字信号处理器将对数字信号进行处理，处理结果被输入到计算机中，并保存在硬盘上，也可经串行口输出到其它终端设备中。

主机和从机之间的通信为半双工方式，由主机开始通信过程。主机首先发送一个唤醒信号，然后等待从机的应答。如未收到应答则重复此过程。从机处于低功耗状态下，当其唤醒电路接收到唤醒信号后，激活从机的其它电路，从机进入正常工作状态后，向主机发送一个应答信号。主机接收到从机的应答后

把待传输的数据进行打包组织、编码、调制和发射，从机接收声波，进行实时处理，恢复出主机发送的数据。主机发送结束后，从机向主机进行数据传输。从机把待传输的数据进行打包组织、编码、调制，然后发射出去，主机在不发射时始终处于接收状态，接收到从机的声波信号后，进行实时处理，恢复出从机发送的数据。

用本发明的空间分集、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器对试验数据处理的结果见图 12。由图 12(a)可见，本发明用于相位跟踪器的 LMS 估计器的增益因子 γ 在三个通道中差异达一个数量级。因此美国专利 5844951 中采用具有二个固定参数的二阶数字锁相环难以检测和跟踪水声信号相位的快速变化。由图 12(b)可以看到，本发明用于自最佳自适应判决反馈均衡器的 LMS 信号处理方法中的增益因子 μ 的变化可达一个数量级，因此美国专利 5844951 中采用确定指数权重因子的快速数值稳定的 RLS 方法难以适应水声信号的快速变化。由图 12 可知，本发明的空间分集、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器在作用距离 2000m 处，达到传输速率 10kbits/s 和位误差概率 1.90×10^{-5} 。

用美国专利 5844951 中的空间分集、快速数值稳定的 RLS 方法的自适应判决反馈均衡器和二阶锁相环的相位跟踪器对与图 12 中相同试验数据分析结果见图 13。由图可见，在作用距离 2000m 处，达到传输速率 10kbits/s 和位误差概率 1.90×10^{-2} ，明显劣于本发明的结果。

实施例 2

按照图 1、图 2 和图 3 制作一用于高码速率、低位误差概率的水声相干通信系统，在另一湖上进行试验。湖上试验布放图同见图 17。该系统的结构、布置方式和试验过程与实施例 1 相同。

用本发明的空间分集、自最佳自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器对试验数据处理的结果见图 18。由图 18(a)可见，本发明用于相位跟踪器的 LMS 估计器的增益因子 γ 在三个通道中差异达数倍，同一通道中 γ 的变化达一个数量级。因此美国专利 5844951 中采用具有二个固定参数的二阶数字锁相环难以检测和跟踪水声信号相位的快速变化。由图 18(b)可以看到，本发明用于自最佳自适应判决反馈均衡器的 LMS 信号处理方法中的增益因子 μ 存在快速的变化，因此美国专利 5844951 中采用确定指数权重因子的快速数值稳定的 RLS 方法难以适应水声信号的快速变化。由图 18 可知，本发明的空间分集、自最佳

自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器在作用距离 4000m 处，达到传输速率 10kbits/s 和位误差概率 1.70×10^{-5} 。

用美国专利 5844951 中的空间分集、快速数值稳定的 RLS 方法的自适应判决反馈均衡器和二阶锁相环的相位跟踪器对与图 18 中相同试验数据分析结果见图 19。由图可见，在作用距离 4000m 处，达到传输速率 10kbits/s 和位误差概率 2.15×10^{-2} 。明显劣于本发明的结果。

为了便于理解，结合附图与实施例已对本发明做了叙述，可以理解本发明有很多实施例，但本发明不限于这些图与实施例。本发明包括本发明精神与范围内所有权利要求范围内的修正案。

权利要求书

1. 一种高码速率低误差概率的水声相干通信系统，包括一个由发射换能器、悬挂于水中的接收线阵和电子分机组成的主机和一个由收发合用的换能器和电子分机组成的从机；其中主机安装在母船或主控水下载体 A 上，发射换能器和接收线阵从母船或主控水下载体 A 上悬挂到水中，发射换能器和接收线阵的电缆分别与电子分机中的发射机和多通道接收机连接；从机安装在水下载体 B 上，收发合用换能器直接安装在水下载体 B 上，其电缆与从机的电子分机中的发射机和接收机连接；其特征是：该系统的中心频率在 7k~45kHz 之间，工作带宽在 5k~20kHz 之间；所述的主机中的接收线阵由 2~16 个水听器组成，悬挂于水中，相邻水听器之间的间距在 8~40 个波长之间，各水听器在水平方向无指向性，接收灵敏度频率响应满足该系统规定的工作频带要求。
2. 根据权利要求 1 所述的高码速率低误差概率的水声相干通信系统，其特征是：所述的主机发射换能器或从机中的收发合用换能器包括在水平方向无指向性，或有指向性换能器，其波束开角为 60~120 度。
3. 根据权利要求 1 所述的高码速率低误差概率的水声相干通信系统，其特征是：所述的主机的电子分机包括发射机、多路接收机、多通道数据采集器、高速数字信号处理器、输入输出接口以及主控计算机；其中接收机与多通道数据采集器电连接，多通道数据采集器与高速数字信号处理器电连接，高速数字信号处理器与带有硬盘的主控计算机电连接，输入输出接口与主控计算机、发射机、多通道接收机电联接。
4. 根据权利要求 1 所述的高码速率低误差概率的水声相干通信系统，其特征是：所述的从机包括：一个收发合用的换能器和一个电子分机，电子分机包括发射机、一路接收机、数据采集器、高速数字信号处理器、输入输出接口以及主控计算机；其中收发合用换能器分别与接收机、发射机电连接，一路接收机的输出端口通过数据采集器与高速数字信号处理器电连接，输入输出接口的 2 个输出接口分别接发射机、一路接收机，输入输出接口还分别与高速数字信号处理器、以及主控计算机连接；所述的电子分机安放在发射船上，收发合用换能器由承重缆和重物悬挂于水中，通过电缆连接到从机的电子分机上。
5. 根据权利要求 4 所述的高码速率低误差概率的水声相干通信系统，所述从机还包括一个唤醒电路，该唤醒电路为一低功耗电路，功耗不大于 10mW，

它输出端口与主控计算机连接，输入端口与收发合用换能器连接。

6. 根据权利要求 1 或 5 所述的高码速率低误差概率的水声相干通信系统，其特征是：所述的发射机的频率响应的中心频率在 7k~45kHz 之间，工作带宽在 5k~20kHz 之间，发射机的输出功率不小于 5W。

7. 根据权利要求 1 所述的高码速率低误差概率的水声相干通信系统，其特征是：所述的主机中的多路接收机由 2~16 通道接收机组成，每个通道与 1 个水听器相联接；各通道的频率响应的中心频率在 7k~45kHz 之间，工作带宽在 5k~20kHz 之间，各通道具有不小于 40dB 的增益，具有滤除工作频带以外的噪声和干扰的带通滤波器和自动增益控制电路。

8. 根据权利要求 4 所述的高码速率低误差概率水声相干通信系统，其特征是：所述的主机中的多通道数据采集器的通道数不少于接收机通道数，对每一通道的采样速率不低于接收机输出信号带宽的 4 倍，AD 转换器的位数不低于 10 位。

9. 根据权利要求 4 所述的高码速率低误差概率水声相干通信系统，其特征是：所述的主机中的高速数字信号处理器的处理能力不小于 400MIPS，RAM 空间不小于 256k 字节，与多通道数据采集器之间的数据通过率不低于多通道数据采集器的输出数据率。

10. 根据权利要求 3 所述的高码速率低误差概率水声相干通信系统，其特征是：所述的从机中的接收机为单通道接收机，与收发合用换能器连接。

11. 根据权利要求 4 所述的高码速率低误差概率水声相干通信系统，其特征是：所述的从机中的数据采集器的采样速率不低于接收机输出信号带宽的 4 倍，AD 转换器的位数不低于 10 位。

12. 根据权利要求 4 所述的高码速率低误差概率水声相干通信系统，其特征是：所述的从机中的高速数字信号处理器的处理能力不小于 33MIPS，RAM 空间不小于 128k 字节，与数据采集器之间的数据通过率不低于数据采集器的输出数据率。

13. 根据权利要求 3 所述的高码速率低误差概率水声相干通信系统，其特征是：所述的主机中的接收机采用正交混频电路，输出正交的基带信号；或不作混频，直接输出载频信号。

14. 根据权利要求 3 或 4 所述的高码速率低误差概率水声相干通信系统，其特征是：所述的主机和从机中的输入输出接口具有 1 路以上 DA 输出，DA 输

出分辨率不低于 10 位，更新速率不低于 30k SPS。

15. 一种应用权利要求 1 所述的高码速率低误差概率水声相干通信系统进行水声相干信号处理的方法，其特征是包括如下步骤：1. 信号的发射过程；2. 信号的接收过程和 3. 接收信号的处理过程；其中信号的发射过程包括：主机/从机首先把待发送的数据进行调制，调制后的数据经过输入输出控制器送到发射机，发射机驱动发射换能器/收发合用换能器发射声波信号；其中主机的接收过程包括：从机发射的声波在水中传播，主机的接收线阵的各个水听器把接收到的声波信号转换成电信号馈给多路接收机，多路接收机处理后经多通道数据采集器变成数字信号；其中从机的接收过程包括：主机发射的声波信号在水中传播，从机的收发合用换能器把接收到的声波信号转换成电信号馈给接收机，接收机处理后经数据采集器变成数字信号；其中接收信号的处理过程包括：数字化的接收信号在高速数字信号处理器中进行处理，获得的结果存在硬盘里，或者经由串行口送到其它终端设备中；发射过程的数据调制方式为多相移键控调制；主机的接收过程采用具有多个水听器的接收线阵、多路接收机和多通道数据采集器，实现空间分集；处理过程采用空间分集、多通道自适应判决反馈均衡器和自最佳自适应相位跟踪器联合信号处理方法，其中多通道自适应判决反馈均衡器采用快速自优化最小均方误差方法，其增益因子 μ 是采用最小均方误差方法自适应调整的；自最佳自适应相位跟踪器对多个通道的信号分别进行相位补偿，采用快速自优化最小均方误差方法，其增益因子 λ 是采用最小均方误差方法自适应调整的。

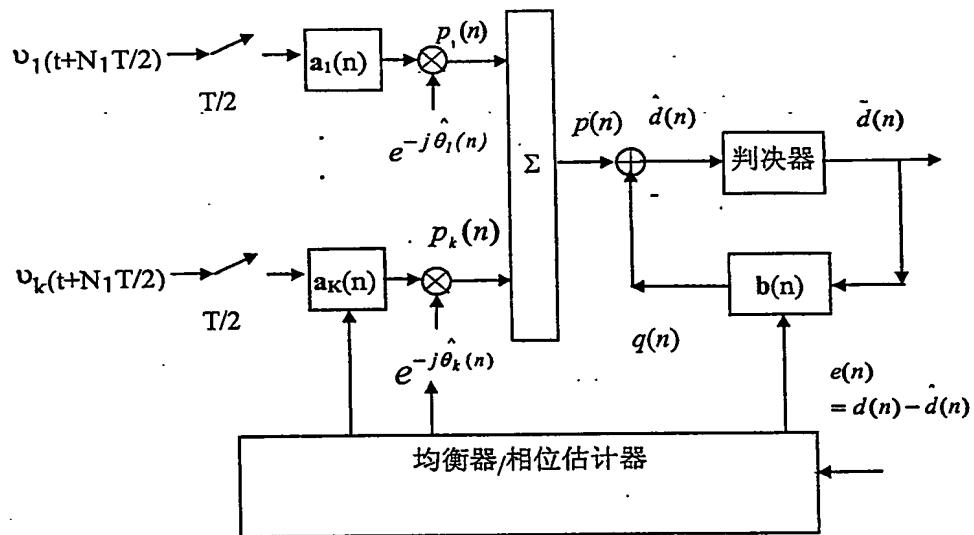


图 1

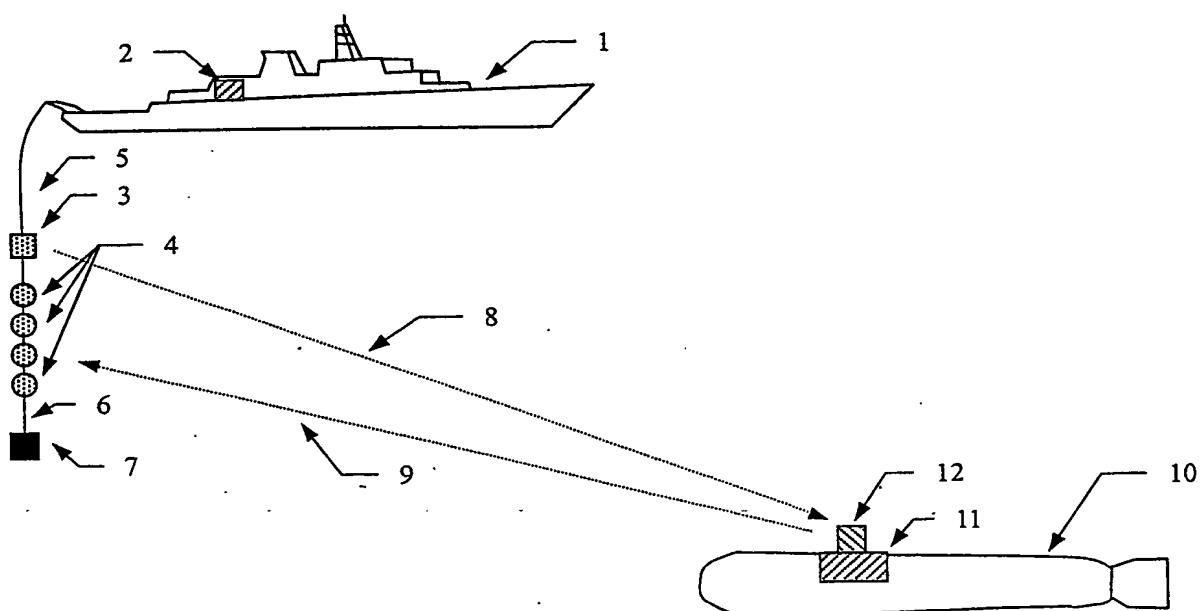


图 2

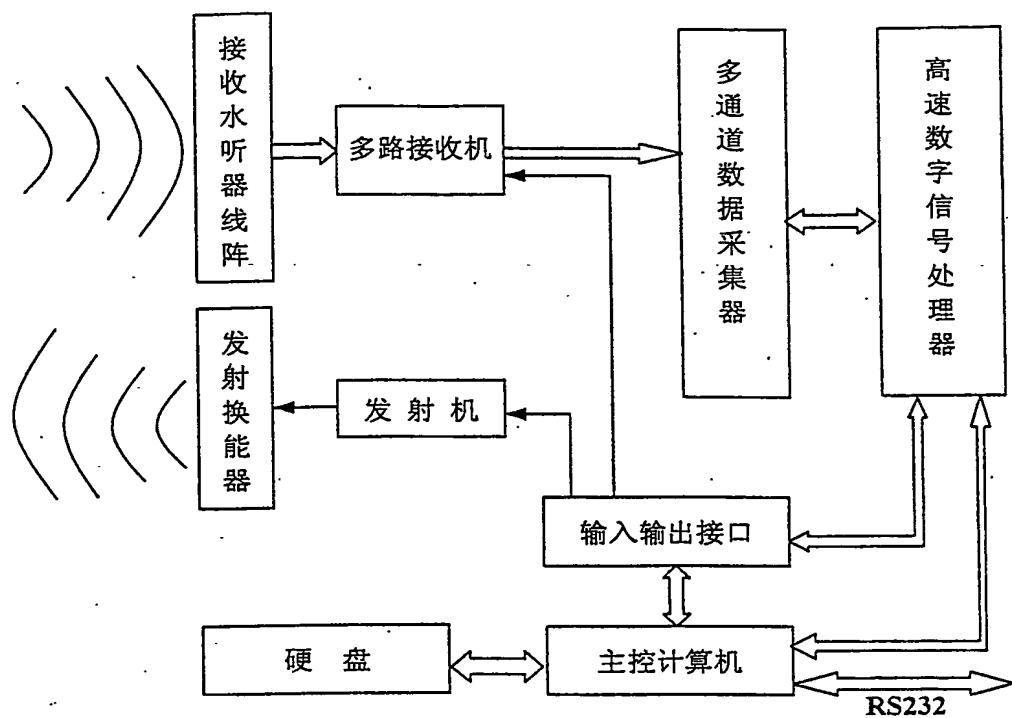


图 3

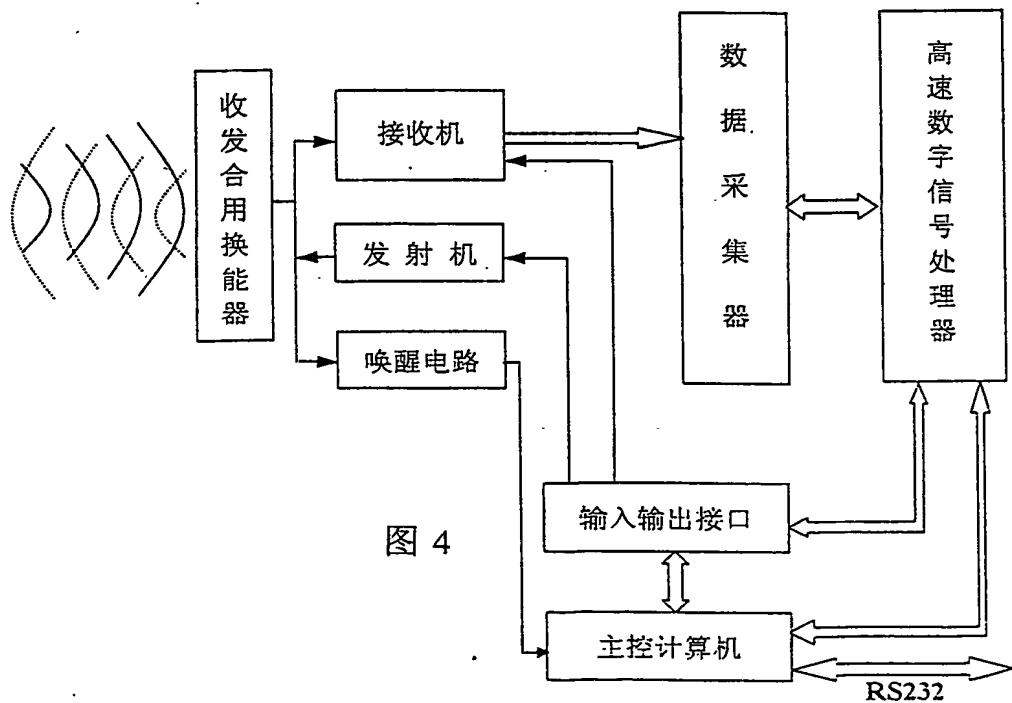


图 4

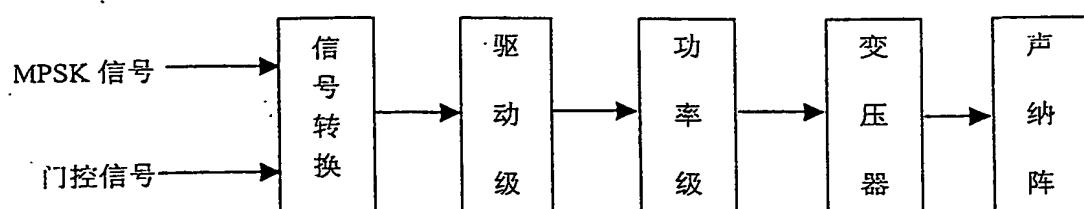


图 5

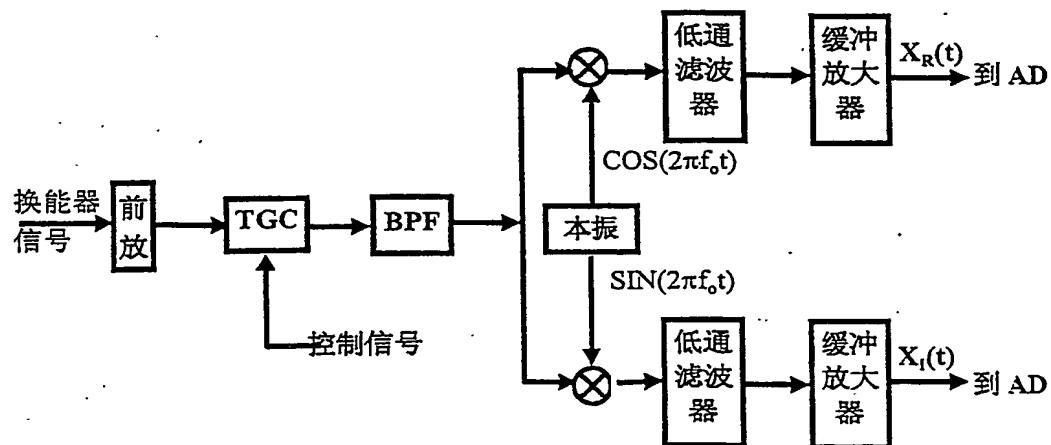


图 6

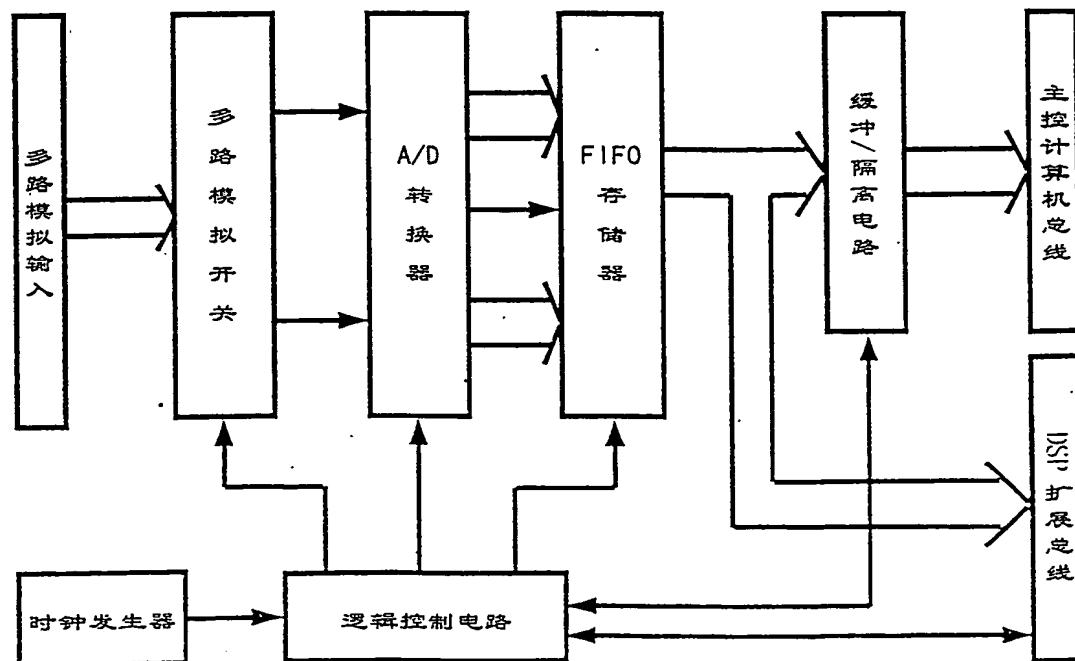


图 7

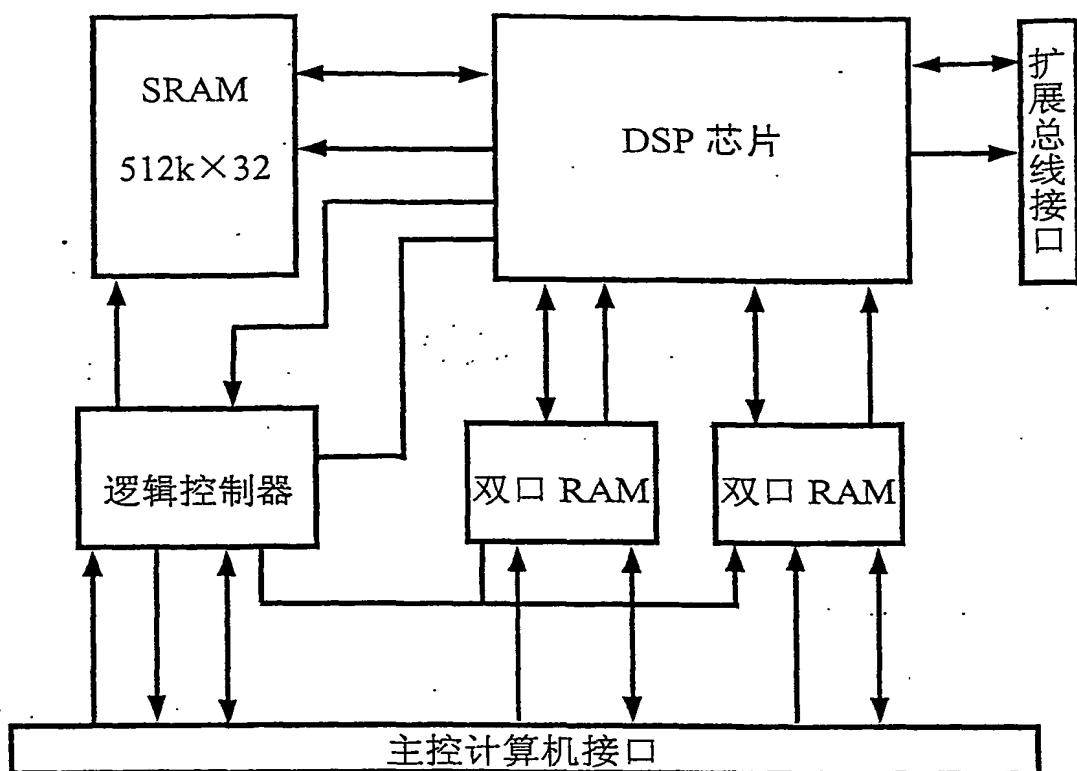


图 8

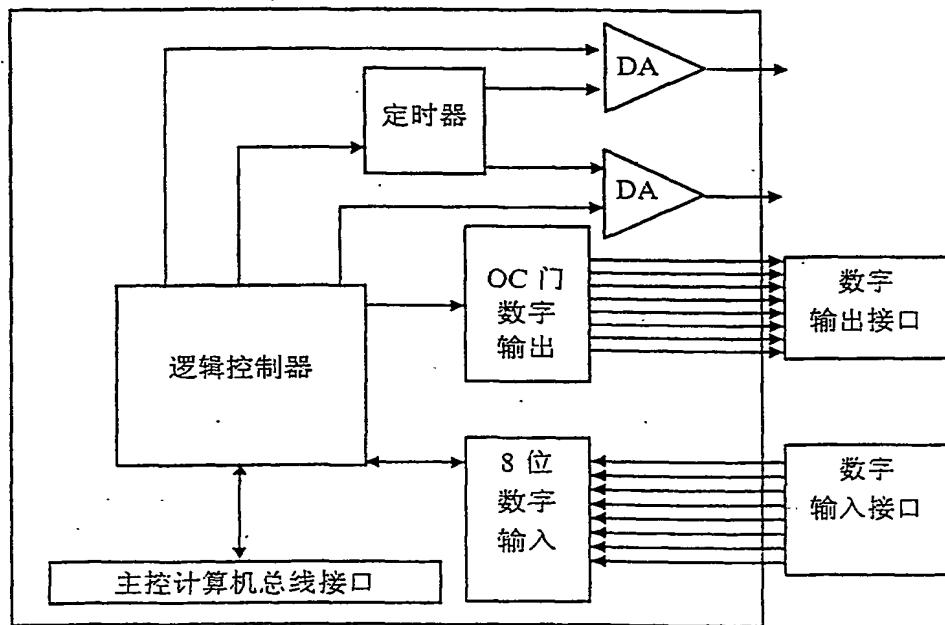


图 9

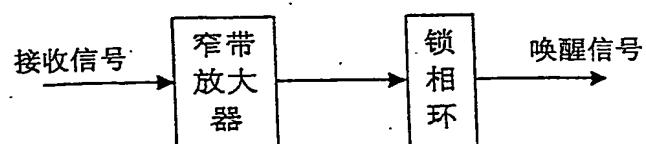


图 10

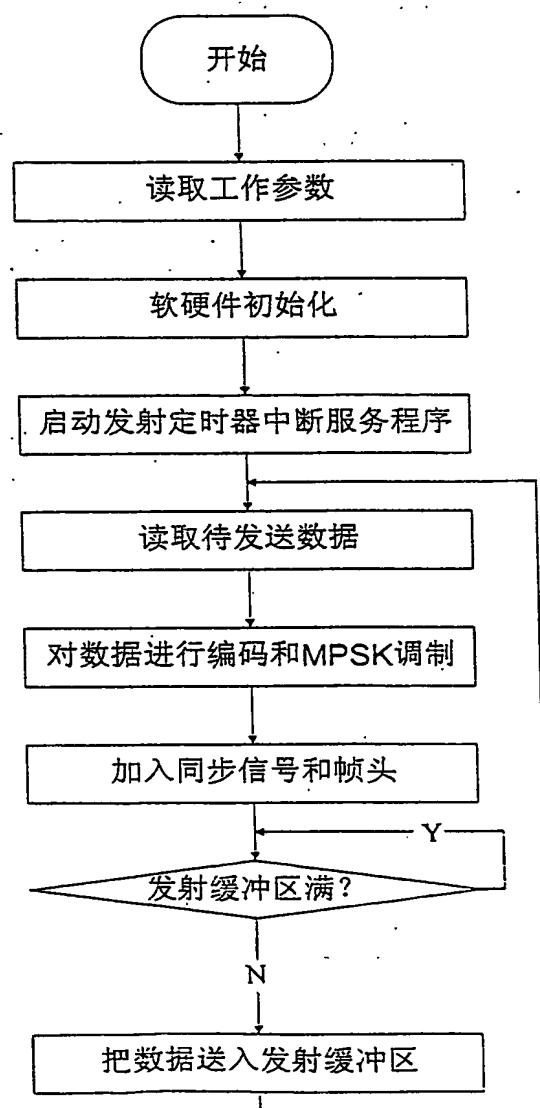


图 11a

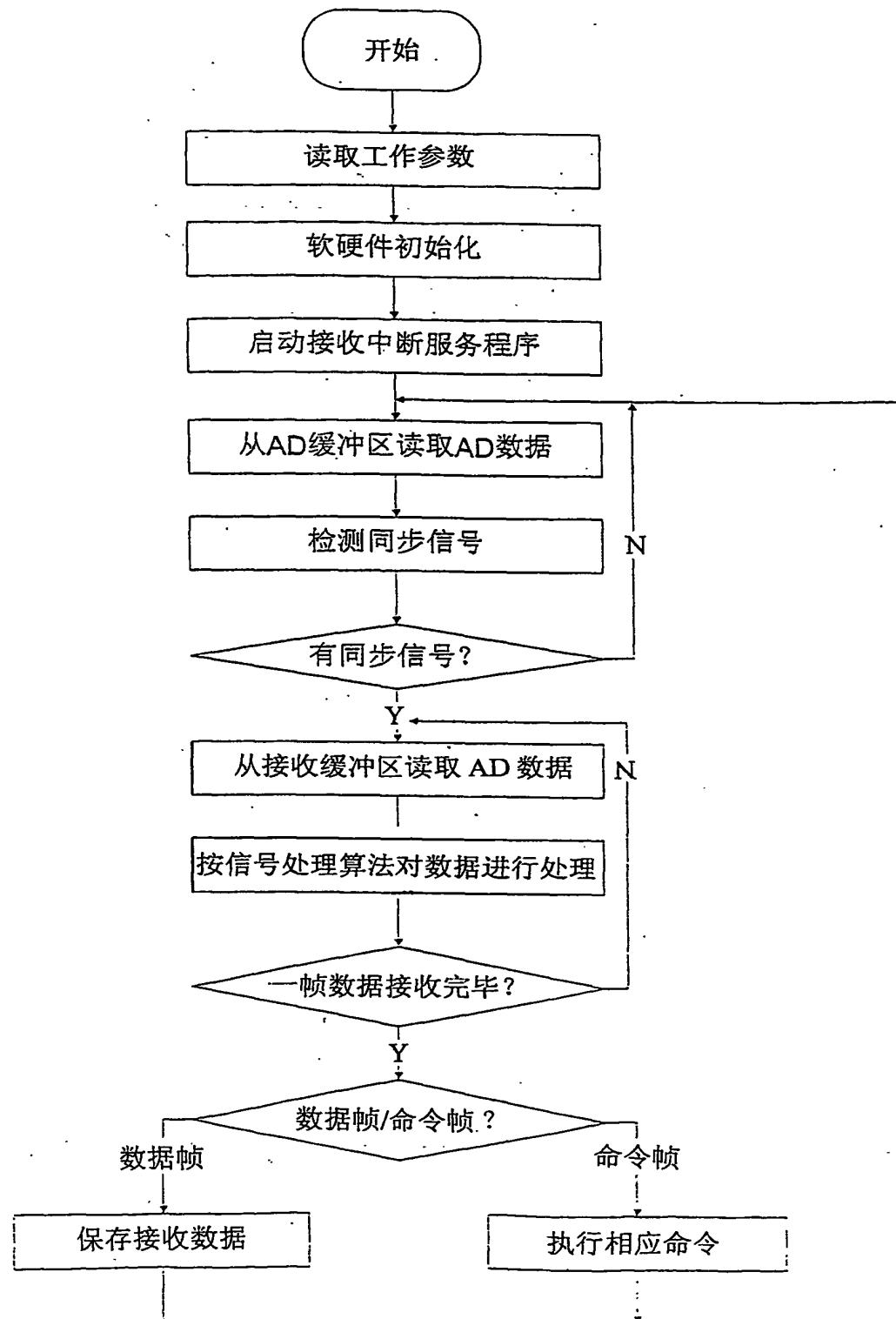
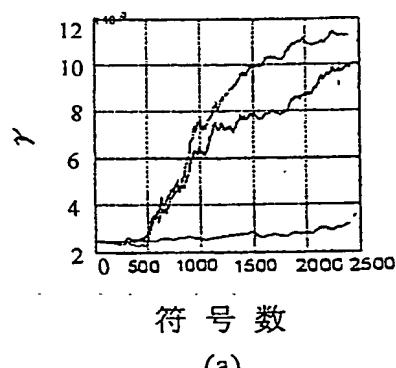
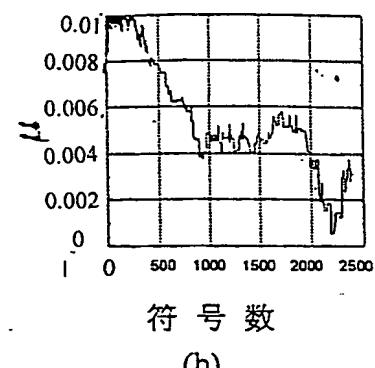


图 11b



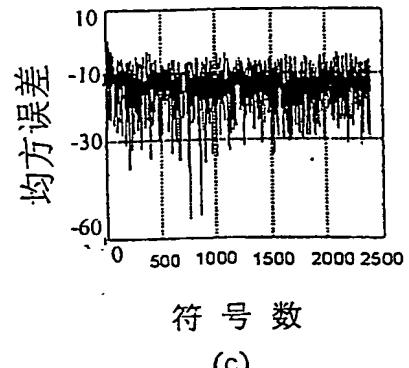
符号数

(a)



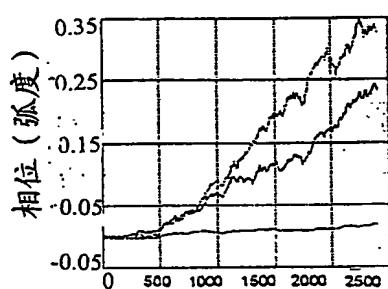
符号数

(b)

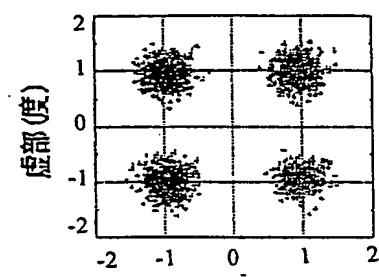


符号数

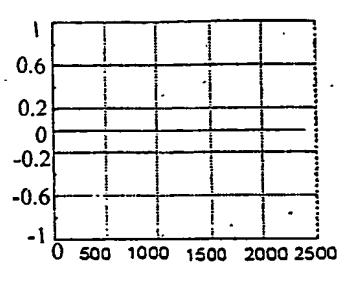
(c)



(d)

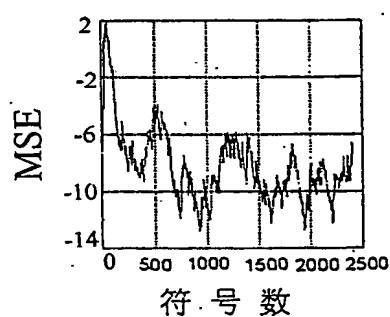


(e)



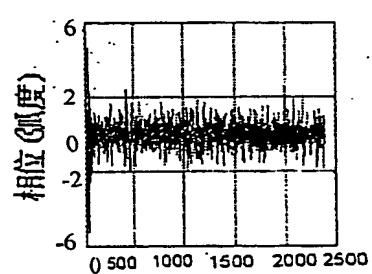
(f)

图 12

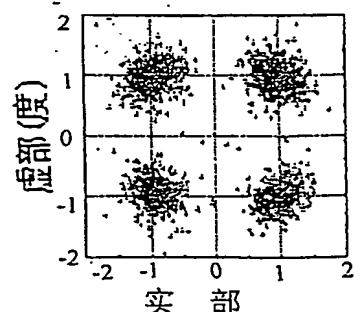


符号数

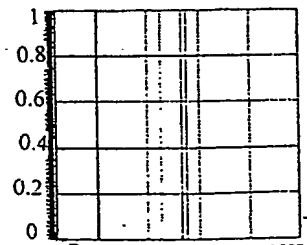
(a)



(b)



(c)



(d)

图 13

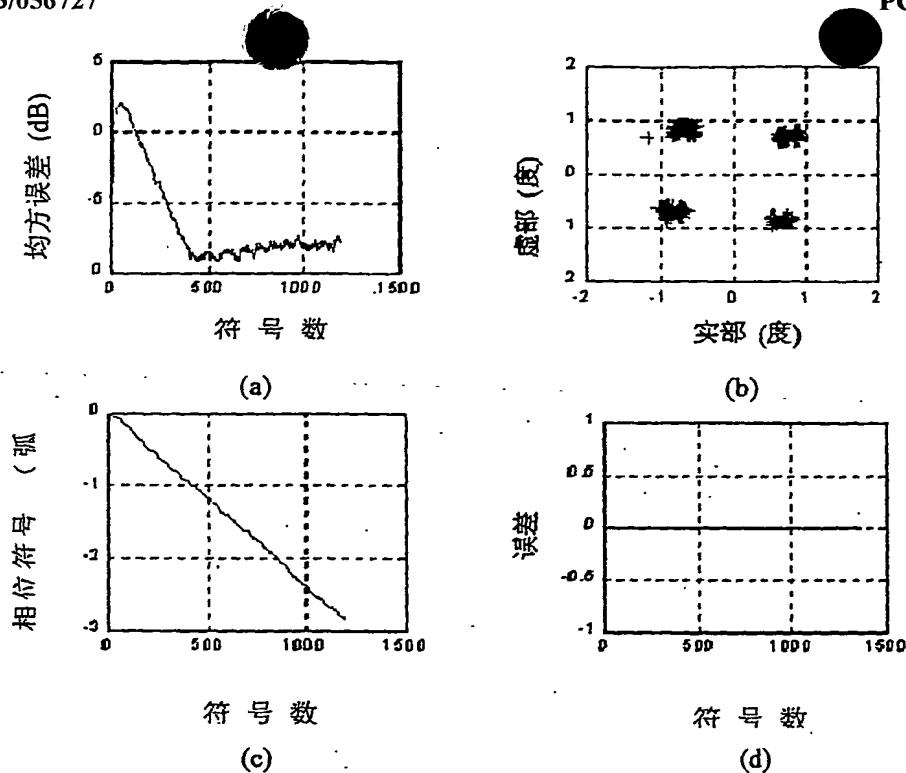


图 14



图 15

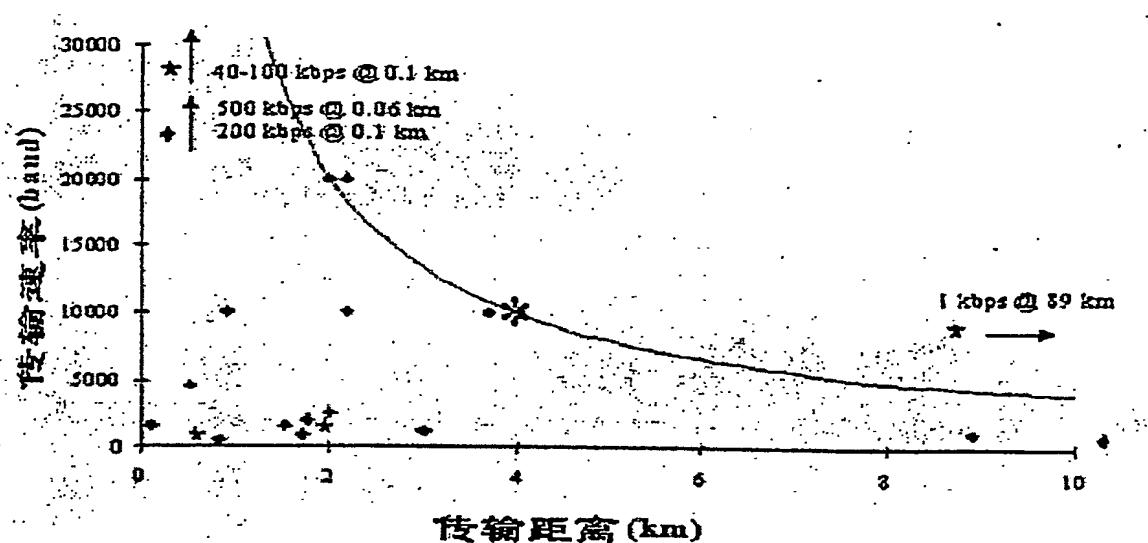


图 16

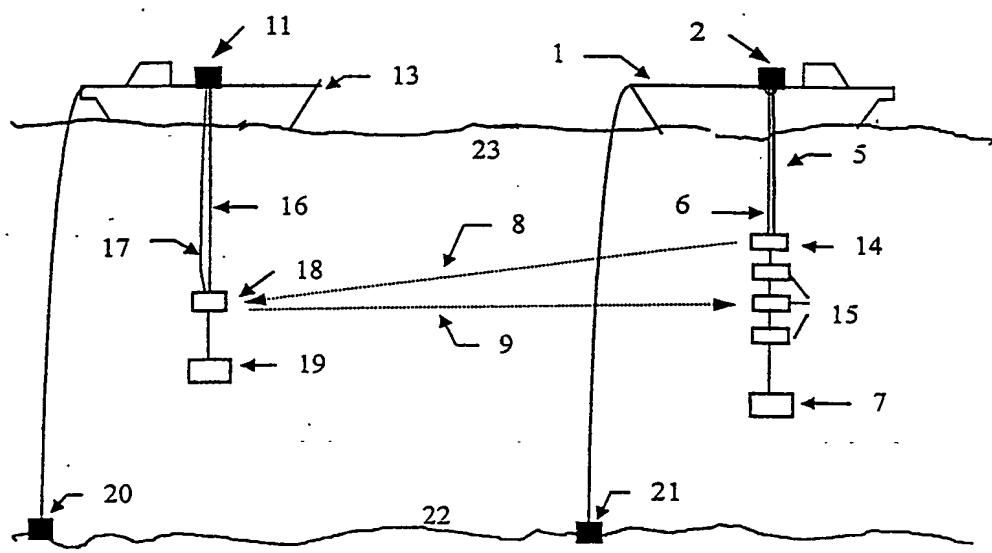


图 17

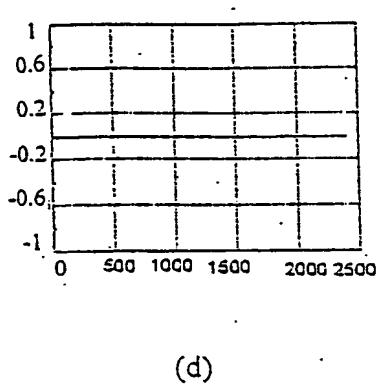
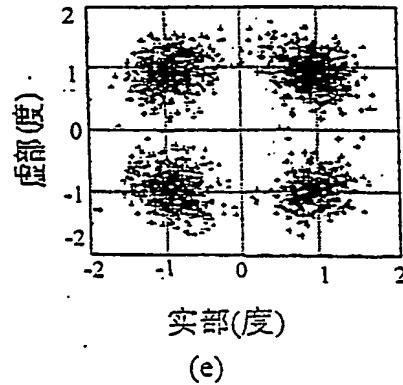
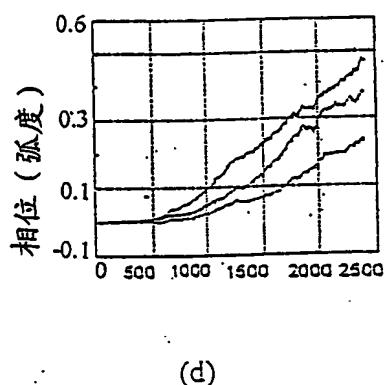
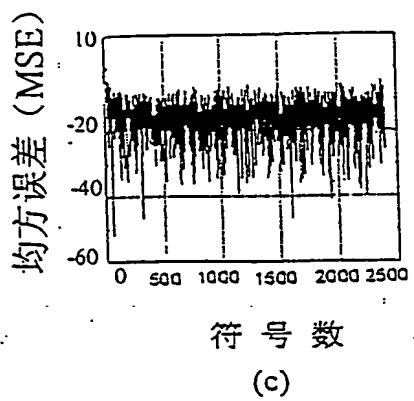
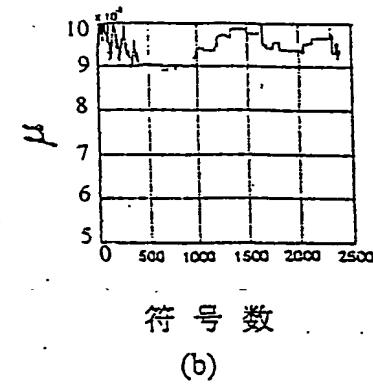
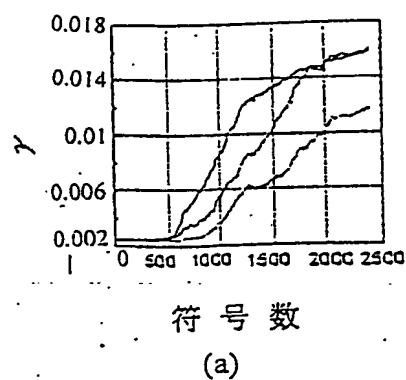


图 18

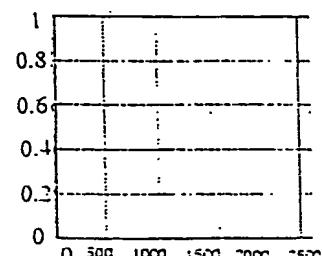
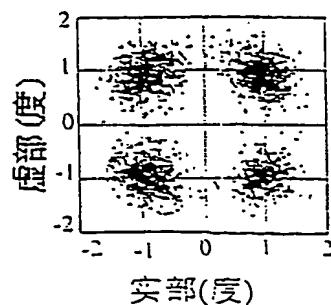
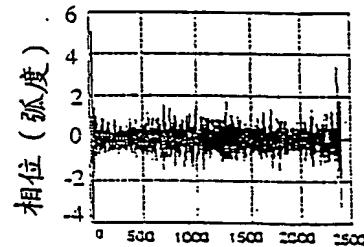
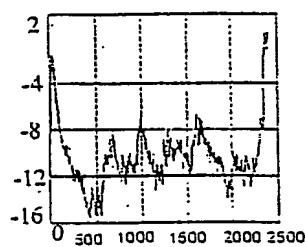


图 19

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN02/00360

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC⁷: H04B 13/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC⁷: H04B 13/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT WPI EPODOC PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US5124955 A (Unisys corporation et.al) 23.Jun.1992 figures 1-4 Abstract	1-15
A	US5432754 A (Northeastern University et.al) 11.July.1995 figure 1 Abstract	1-15
A	US5784339 A (Ocean Vision Technology, Inc. Naples Fla) 21.July.1998 figures 1-12 Abstract	1-15

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim (S) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
24. September. 2002(24. 09. 02)

Date of mailing of the international search report

07 NOV 2002 (07.11.02)

Name and mailing address of the ISA/CN
6 Xitucheng Rd., Jimen Bridge, Haidian District,
100088 Beijing, China
Facsimile No. 86-10-62019451

Authorized officer

Fengxiaoming



Telephone No. 86-10-62093362

INTERNATIONAL SEARCH REPORTInternational application No.
PCT/CN02/00360

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US5301167 A (Northeastern University et.al) 05.Apr.1994 figures 1-7 Abstract	1-15
A	US5029147 A (The United States of America as represented by the secretary of the Navy, Washington , DC.) 02.Jul.1991 figures 1-11 Abstract	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information patent family members

Search request No.

PCT/CN02/00360

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US5124955 A	1992-06-23	None	
US5432754 A	1995-07-11	US5303207A WO9410629A1 AU5451694A	1994-04-12 1994-05-11 1994-05-24
US5784339A	1998-07-21	None	
US5301167A	1994-04-05	WO9516312A1 AU5744094A	1994-04-05 1995-06-27
US5029147A	1991-07-02	None	

国际检索报告

国际申请

PCT/CN02/00360

A. 主题的分类IPC⁷: H04B 13/02

按照国际专利分类表(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类体系和分类号)

IPC⁷: H04B 13/02

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称和, 如果实际可行的, 使用的检索词)

CNPAT WPI EPODOC PAJ

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求编号
A	US5124955 A (Unisys corporation 等) 1992 年 6 月 23 日 图 1-4 摘要	1-15
A	US5432754 A (Northeastern University 等) 1995 年 7 月 11 日 图 1 摘要	1-15
A	US5784339 A (Ocean Vision Technology, Inc. Naples Fla) 1998 年 7 月 21 日 图 1-12 摘要	1-15

 其余文件在 C 栏的续页中列出。 见同族专利附件。

* 引用文件的专用类型:

“A” 明确叙述了被认为不是特别相关的一般现有技术的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先的申请或专利

“L” 可能引起对优先权要求的怀疑的文件, 为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布的在后文件, 它与申请不相抵触, 但是引用它是为了理解构成发明基础的理论或原理

“X” 特别相关的文件, 仅仅考虑该文件, 权利要求所记载的发明就不能认为是新颖的或不能认为是有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 权利要求记载的发明不具有创造性

“&” 同族专利成员的文件

国际检索实际完成的日期

24. 9 月 2002 年 (24. 09. 02)

国际检索报告邮寄日期

07. 11月 2002 (07. 11. 02)

国际检索单位名称和邮寄地址

ISA/CN
中国北京市海淀区西土城路 6 号(100088)

传真号: 86-10-62019451

受权官员



电话号码: 86-10-62093362

C(续). 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求编号
A	US5301167 A (Northeastern University 等) 1994 年 04 月 05 日 图 1-7 摘要	1-15
A	US5029147 A (The United States of America as represented by the secretary of the Navy, Washington , DC.) 1991 年 07 月 02 日 图 1-11 摘要	1-15

国际检索报告
关于同族专利成员的情报

国际申请号
PCT/CN02/00360

检索报告中引用的专利文件	公布日期	同族专利成员	公布日期
US5124955 A	1992-06-23	无	
US5432754 A	1995-07-11	US5303207A WO9410629A1 AU5451694A	1994-04-12 1994-05-11 1994-05-24
US5784339A	1998-07-21	无	
US5301167A	1994-04-05	WO9516312A1 AU5744094A	1994-04-05 1995-06-27
US5029147A	1991-07-02	无	